Vol. 20 No. 3
May, 2023
天 文 研 究 与 技 术
ASTRONOMICAL RESEARCH & TECHNOLOGY
第 20 卷 第 3 期
2023 年 5 月

DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230323.001

耀变体的宽波段谱指数分布及其分类作用

陈志晖[1,2]，易庭丰[1,2*]，陈军平[1]，王 娜[1]，普治元[1]，张 顺[1]
（1. 云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明 650500；2. 广西相对论天体物理重点实验室，广西 南宁 530004）

摘要： 耀变体(Blazar)的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution，SED)中显示有两个明显的峰，其中低能峰为同步辐射峰。耀变体同步辐射峰的峰值功率与峰值频率存在反相关关系，因此与光谱能量分布峰值有关的多波段复合光谱指数构建的谱指数平面可以作为耀变体的两个亚类(平谱射电类星体(Flat Spectrum Radio Quasar，FSRQ)和蝎虎座 BL 型天体(BL Lac))的分类器。通过斯特拉斯堡天文台的数据库为费米 4 期目录(4FGL-DR3)中的耀变体进行了多波段数据的交叉匹配，得到多波段数据样本。在此基础上发现，耀变体的 8 个宽波段谱指数(α_{rw1}，α_{rw2}，α_{rw3}，α_{ro}，$\alpha_{r\gamma}$，α_{w1w2}，α_{w1w3}和 α_{w3x})分布具有双峰结构，且明显区分耀变体的两个亚类。通过机器学习中的支持向量机(Support Vector Machine，SVM)模型，进一步分析了谱指数平面对耀变体亚类的分类作用，发现大部分谱指数平面分类的准确率在 80%以上。

关键词： 耀变体；宽波段谱指数；机器学习；分类方法
中图分类号： P141.5 **文献标识码：** A **文章编号：** 1672-7673(2023)03-0189-09

耀变体是带有喷流的射电噪活动星系核(Active Galactic Nuclei，AGN)，它们构成了一类特殊的活动星系核。在整个电磁波谱上，耀变体具有非热连续谱，相对论喷流指向地球[1]。根据其光学光谱特征，它们通常分为两个亚类，即平谱射电类星体和蝎虎座 BL 型天体[1]。平谱射电类星体具有显著的宽发射线，其等值宽度>0.5 nm，而蝎虎座 BL 型天体的光谱是平滑的连续谱或仅显示弱线。耀变体两个亚类的主要区别在于它们的发射线，也可以根据活动星系核的不同吸积机制进行划分，即平谱射电类星体比蝎虎座 BL 型天体具有较高的吸积率[2-4]。还有研究者提出用中心黑洞自旋划分平谱射电类星体和蝎虎座 BL 型天体，即蝎虎座 BL 型天体的中心黑洞的旋转速度比平谱射电类星体的慢[5]。

1998 年，文[6]发现了耀变体序列。耀变体序列表明，在耀变体的宽波段光谱能量分布中有两个明显的成份(能量低的为同步峰，能量高的为逆康普顿峰)，随着同步峰值频率向蓝端移动，辐射热光度减小，即同步峰值光度与峰值频率成反比。平谱射电类星体的同步峰值频率一般小于 10^{14} Hz，而蝎虎座 BL 型天体的同步峰值频率分布比平谱射电类星体的宽得多。所以，该亚类又进一步分成高峰频(大于 10^{15} Hz)、中峰频($10^{14}<\nu_{peak}<10^{15}$)和低峰频(小于 10^{14} Hz)蝎虎座 BL 型天体[7]。正是由于耀变体两个亚类的同步峰值频率的分布差异，宽波段谱指数（复合光谱指数）分布中常常出现双峰结构。另外，谱指数-谱指数图中出现明显的成团性，该特征具有一定的分类作用。相比于光谱能量分布图，谱指数更容易在巡天数据库中获得，因此更适合在巡天大样本中快速区分耀变体的两个亚类。

费米大面积望远镜自 2008 年在轨运行以来发现了大量的伽马射线源，其中耀变体占绝大多数[7-8]，也包括大量不确定类型的耀变体。通常，这些耀变体由于没有确凿的光谱观察而不能确定是否是平谱射电类星体或蝎虎座 BL 型天体。本文对第 4 期费米大面积望远镜活动星系核目录第三批发

基金项目：国家自然科学基金（12063007，11863007）；国家天文台云南师范大学天文科普教育基地（04800205020503008）资助.
收稿日期：2023-02-07；修订日期：2023-02-22
作者简介：陈志晖，男，硕士研究生，主要研究活动星系核. Email：chenzhihui2021@163.com.
* 通信作者：易庭丰，男，副教授，主要研究活动星系核. Email：yitingfeng@ynnu.edu.cn.

布数据(4LAC-DR3)，以谱指数-谱指数图为基础，将复合光谱指数作为机器学习程序的输入参数，对该目录中的耀变体进行分析研究。

1 样 本

费米伽马射线空间望远镜(Fermi)团组于 2022 年公布了新的伽马射线源目录(4FGL-DR3)[9]。基于 12 年的伽马射线观测数据，该目录包含 6 658 个伽马射线源，其中 4 501 个源找到了其他波段的对应体，剩下 2 157 个源没有找到对应体。有其他波段对应体的源主要是耀变体，约占 91%，这些耀变体中 1 457 个是蝎虎座 BL 型天体，794 个是平谱射电类星体，剩下 1 492 个是不确定类型的耀变体候选体[9]。基于这个目录(4FGL-DR3)，我们通过法国斯特拉斯堡天文台的数据库(Strasbourg astronomical Data Center，CDS，http://cdsxmatch.u-strasbg.fr/#tab=xmatch&)，与多巡天数据库进行交叉匹配，得到多波段数据。我们总共得到了 7 个波段的数据，这 7 个波段分别为 γ-ray，X-ray，WISE w1，w2 和 w3 波段，射电波段(1.4 GHz)，Gaia 卫星的 g 波段。表 1 给出了各个波段的样本数量。

2 宽波段能谱指数的分布

耀变体的光谱斜率常用能谱指数描述。其中，两点(复合)光谱指数(Two-point Spectral Indices)可以在一定程度上描述耀变体的宽波段能谱能量分布的形状。两点光谱指数也称为宽波段谱指数或者复合谱指数，其本质是能谱上两点间的斜率。两点(复合)光谱指数可通过

$$\alpha_{12} = -\frac{\log\left(\frac{F_1}{F_2}\right)}{\log\left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}\right)} \tag{1}$$

计算(Ledden & O′Dell 1985)[10]，其中，F_1 和 F_2 分别是频率 ν_1 和 ν_2 时的流量密度。使用(1)式将星等转换为流量密度，

$$-2.5\lg(f) = m - F_0 , \tag{2}$$

其中，F_0 为零星等流量；m 为星等值；f 为对应的流量密度。对于样本中的所有耀变体，我们使用频率为射电波段(1.4 GHz)，w1(3.4 μm)，w2(4.6 μm)，w3(12 μm)，g(330~1 050 nm)，1 keV 和 100 MeV 处的通量密度计算了射电、红外、光学、X 射线、γ 射线两两之间的谱指数。图 1~图 2 给出了表 1 中列出的 7 个波段排列组合得到的 21 个光谱指数分布。

表 1 宽波段数据样本

Table 1 The data sample of multi-wavelength

Band	Sample size		
	FSRQ	BL Lac	BCU
γ-ray	750	1 410	1 516
Radio	608	886	927
Gaia g	723	1 361	1 146
Swift X-ray	314	551	134
WISE w1	726	1 356	1 237
WISE w2	726	1 356	1 237
WISE w3	726	1 356	1 234

从图 1~图 2 可以看出，9 个宽波段谱指数 α_{rw1}，α_{rw2}，α_{rw3}，α_{ro}，$\alpha_{r\gamma}$，α_{w1w2}，α_{w1w3}，α_{w3x} 和 $\alpha_{o\gamma}$ 的分布具有微弱的双峰结构，其他 12 个宽波段谱指数的分布并没有双峰结构。这种双峰结构可能分别对应于耀变体的两个亚类。这也表明平谱射电类星体与蝎虎座 BL 型天体之间可能存在不同的能谱特性。为了进一步验证上述 9 个宽波段谱指数对耀变体两个子类的分布差异，我们将两个子类的分布对比画在一起，如图 3。我们发现除了 $\alpha_{o\gamma}$ 之外，其他 8 个谱指数都能明显区分平谱射电类星体与蝎虎座 BL 型天体。

3 谱指数-谱指数图及分类方法

在第 2 节中，我们看到单个谱指数分布图对耀变体两个子类的区分度并不强，我们需要进一步考虑谱指数-谱指数图。如图 4，我们可以在谱指数-谱指数图上看到耀变体的两个亚类有明显的成团性。

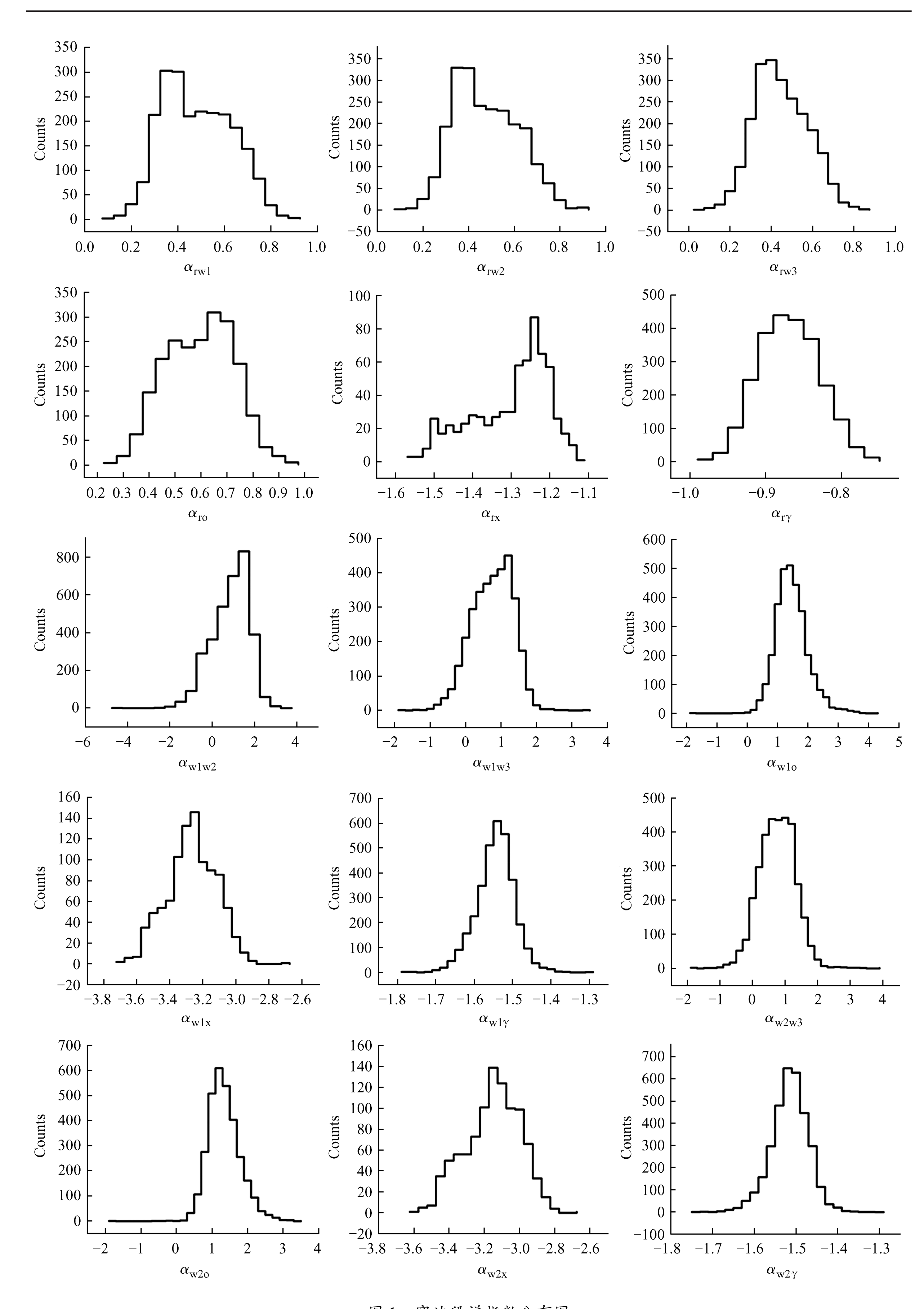


图 1　宽波段谱指数分布图

Fig. 1　Broadband spectral index distribution

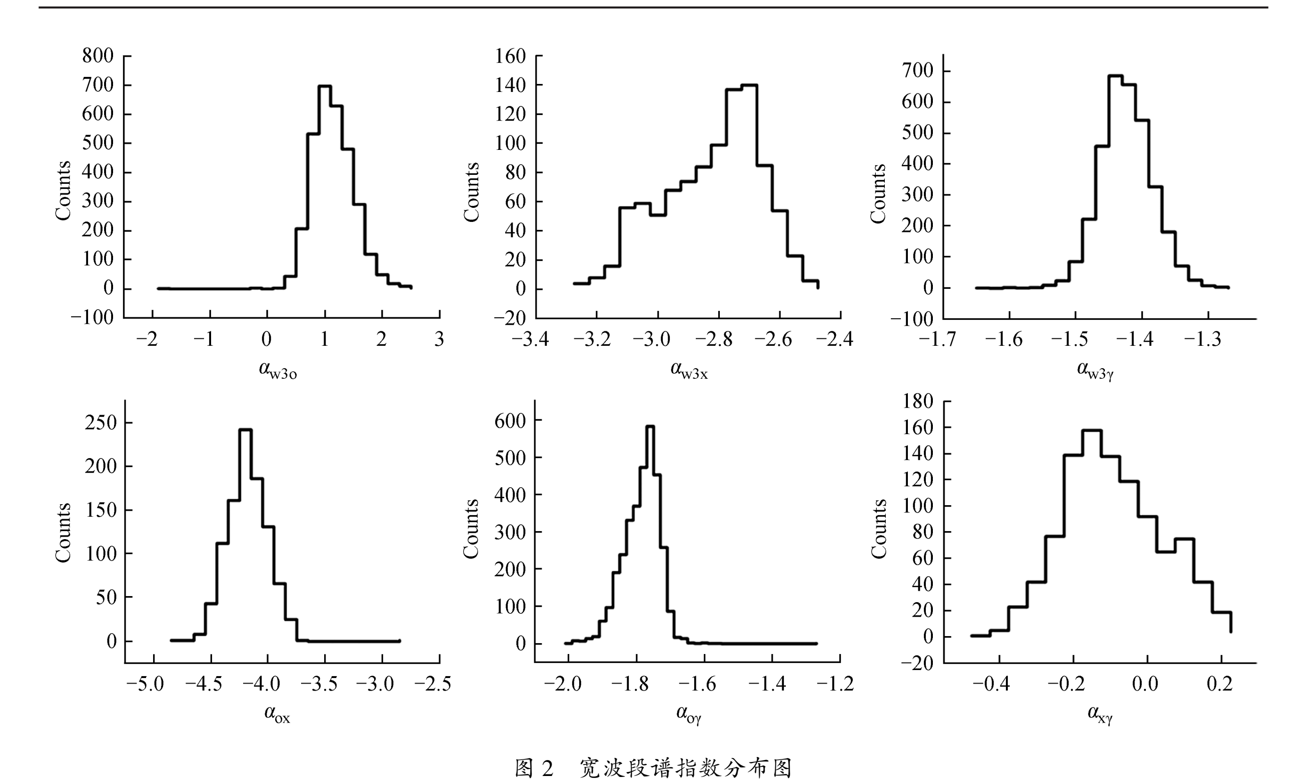


图 2 宽波段谱指数分布图

Fig. 2 Broadband spectral index distribution

图 3 耀变体的两个亚类(FSRQ 与 BL Lac)的宽波段谱指数分布图

Fig. 3 The distribution of the broad band spectral index of the two subclasses (FSRQ and BL Lac) of the blazar

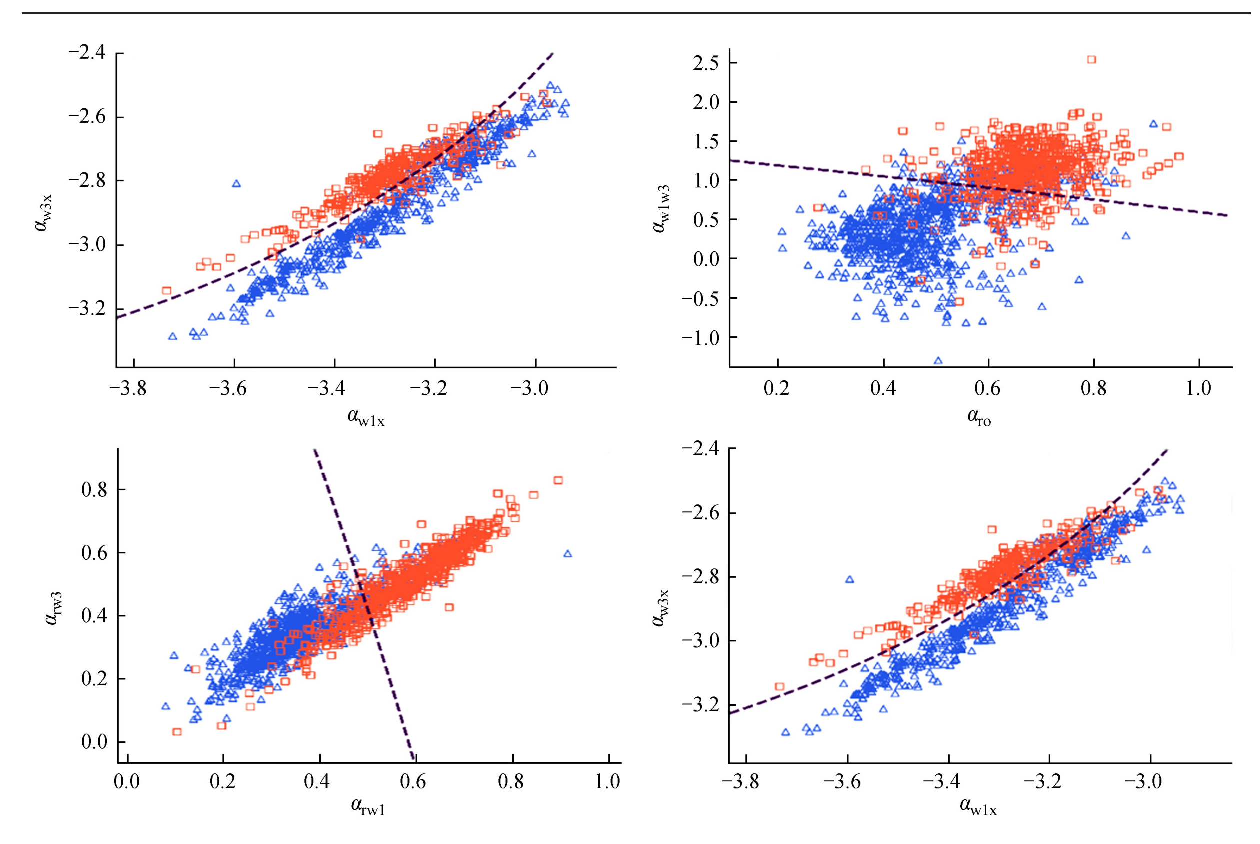


图 4　4 个典型的谱指数-谱指数图。红色方框代表平谱射电类星体，蓝色三角形代表蝎虎座 BL 型天体

Fig. 4　Four typical spectral index-spectral index planes. The red box represents FSRQ, and the blue triangle represents BL Lac

为了更好地分析谱指数-谱指数图对耀变体的分类作用，我们需要为机器学习方法选择合适的参数和算法[11-14]。文[15]认为支持向量机的分类算法效果比较好。支持向量机分类算法是在特征空间中寻找一个超平面来区分不同类别的算法，使得该超平面与两个类别的距离最大，进而达到分类的目的。支持向量机是有监督的机器学习方法。一般情况下大部分数据集是线性不可分的，因此需要把数据集从低维的特征空间映射到高维的特征空间，从而达到更好的分类效果。常见的核函数有线性核、多项式核、径向基函数核等。我们也采用支持向量机，并下载了相关的 Python 程序模块(https://scikit-learn.org/stable/modules/svm.html#svm-classification)。我们把蝎虎座 BL 型天体称为正类，平谱射电类星体称为负类。根据这个定义，正确分类的蝎虎座 BL 型天体称为真阳性 TP(True Positive)，而正确分类的平谱射电类星体为真阴性 TN(True Negative)；把蝎虎座 BL 型天体错误地预测为平谱射电类星体称为假阳性 FP(False Positive)，而把平谱射电类星体错误地预测为蝎虎座 BL 型天体则称为假阴性(False Negative)。对于二分类，以上符号可以用表 2 描述，最上面一行表示真实类标签，最左边一列表示预测类别。

表 2　混淆矩阵

Table 2　The confusion matrix

	True BL Lac	True FSRQ
Predicted BL Lac	TN	FN
Predicted FSRQ	FP	TP

根据常用的分类性能指标，准确率(Accuracy Rate，AR)计算公式为[15-16]

$$AR = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} . \quad (3)$$

图 4 给出了表 3 列出的 210 个谱指数-谱指数图中成团性较好的 4 个典型图，图中虚线为模型给的两类耀变体的分界线，具体是通过计算谱指数图中的点属于平谱射电类星体的概率以及属于蝎虎座 BL 型天体的概率，两者概率之差为 0 的点即组成该分界线。从图 4 可以看出，平谱射电类星体和蝎虎座 BL 型天体主要占据不同的区域，这表明它们具有不同的能谱特性。但是，我们也可以看到两类耀变体占据区域有一部分重合，其中右下图重合部分较多，分界不清晰，因而更需要机器学习的方法

进行分类。图 4 显示平谱射电类星体和蝎虎座 BL 型天体谱指数之间的关系表明它是复杂的，这也与之前的结论一致[17-21]。表 3 中第 3、6、9 和 12 列给出了谱指数-谱指数图对耀变体两个子类的分类准确率。

表 3　谱指数-谱指数图分类的准确率

Table 3　The spectral index-spectral index planes classification accuracy

Planes	Sample size	Accuracy rate/%	Planes	Sample size	Accuracy rate/%	Planes	Sample size	Accuracy rate/%	Planes	Sample size	Accuracy rate/%
$\alpha_{w1x}-\alpha_{w3x}$	845	88.8	$\alpha_{rw1}-\alpha_{rx}$	582	84.7	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w2\gamma}$	1 450	83.0	$\alpha_{w2\gamma}-\alpha_{w3x}$	845	74.7
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{ox}$	842	87.8	$\alpha_{rw1}-\alpha_{w1w3}$	1 450	84.7	$\alpha_{ro}-\alpha_{o\gamma}$	1 451	82.8	$\alpha_{w2o}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	74.5
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w1x}$	845	87.8	$\alpha_{rw1}-\alpha_{w3x}$	582	84.7	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w3x}$	582	82.8	$\alpha_{ox}-\alpha_{x\gamma}$	859	74.3
$\alpha_{w1x}-\alpha_{w2x}$	845	87.8	$\alpha_{w2w3}-\alpha_{w2x}$	845	84.7	$\alpha_{rw2}-\alpha_{rx}$	582	82.6	$\alpha_{rx}-\alpha_{x\gamma}$	598	74.1
$\alpha_{ro}-\alpha_{w1x}$	579	87.7	$\alpha_{ro}-\alpha_{w1\gamma}$	1 422	84.5	$\alpha_{rx}-\alpha_{w2w3}$	582	82.5	$\alpha_{w3\gamma}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	74.0
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w2x}$	845	87.7	$\alpha_{rw1}-\alpha_{x\gamma}$	582	84.5	$\alpha_{w2o}-\alpha_{w3o}$	2 045	82.3	$\alpha_{w2x}-\alpha_{o\gamma}$	842	73.9
$\alpha_{w2x}-\alpha_{w3x}$	845	87.6	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w3o}$	1 422	84.5	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w1w3}$	1 450	82.2	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{w3x}$	845	73.8
$\alpha_{ro}-\alpha_{w2x}$	579	87.4	$\alpha_{rx}-\alpha_{w2x}$	582	84.5	$\alpha_{w2w3}-\alpha_{w2o}$	2 045	82.2	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{x\gamma}$	598	73.7
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w3x}$	845	87.3	$\alpha_{ro}-\alpha_{w3o}$	1 422	84.4	$\alpha_{ro}-\alpha_{w2w3}$	1 422	82.1	$\alpha_{rx}-\alpha_{r\gamma}$	598	73.6
$\alpha_{ro}-\alpha_{w3x}$	579	87.0	$\alpha_{rw2}-\alpha_{o\gamma}$	1 422	84.4	$\alpha_{rw3}-\alpha_{rx}$	582	82.0	$\alpha_{rx}-\alpha_{o\gamma}$	592	72.8
$\alpha_{rw1}-\alpha_{w3o}$	1 422	86.8	$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w3o}$	2 045	84.4	$\alpha_{rw3}-\alpha_{o\gamma}$	1 422	81.8	$\alpha_{w2o}-\alpha_{w2x}$	842	72.7
$\alpha_{ro}-\alpha_{ox}$	592	86.7	$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w2o}$	2 045	84.4	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{w2w3}$	2 082	81.8	$\alpha_{w2o}-\alpha_{ox}$	842	72.6
$\alpha_{w1w3}-\alpha_{ox}$	842	86.7	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w1w3}$	1 450	84.3	$\alpha_{w2w3}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	81.8	$\alpha_{rx}-\alpha_{w2\gamma}$	582	72.3
$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w1x}$	845	86.7	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w1\gamma}$	1 450	84.3	$\alpha_{w2w3}-\alpha_{w3o}$	2 045	81.8	$\alpha_{w2x}-\alpha_{x\gamma}$	845	72.3
$\alpha_{rx}-\alpha_{ox}$	592	86.5	$\alpha_{ro}-\alpha_{w1w2}$	1 422	84.2	$\alpha_{rx}-\alpha_{w3x}$	582	81.6	$\alpha_{rx}-\alpha_{w3o}$	579	72.0
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{x\gamma}$	845	86.5	$\alpha_{rx}-\alpha_{w1w3}$	582	84.2	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w1\gamma}$	1 450	81.5	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	71.7
$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w2x}$	845	86.4	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w3o}$	2 045	84.2	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{w3o}$	2 045	81.5	$\alpha_{w1x}-\alpha_{w2o}$	842	71.3
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w1o}$	2 045	86.3	$\alpha w_{1w3}-\alpha_{w1o}$	2 045	84.2	$\alpha_{w2w3}-\alpha_{w2\gamma}$	2 082	81.5	$\alpha_{w1x}-\alpha_{w1\gamma}$	845	71.2
$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w3x}$	845	86.2	$\alpha_{rw1}-\alpha_{rw2}$	1 450	84.1	$\alpha_{w2w3}-\alpha_{w3\gamma}$	2 082	81.5	$\alpha_{w2o}-\alpha_{w3x}$	842	71.1
$\alpha_{rw1}-\alpha_{w2o}$	1 422	86.1	$\alpha_{rw1}-\alpha_{w2\gamma}$	1 450	84.1	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w3x}$	582	81.1	$\alpha_{w2x}-\alpha_{w2\gamma}$	845	71.0
$\alpha_{rx}-\alpha_{w1w2}$	582	86.1	$\alpha_{rw1}-\alpha_{w3\gamma}$	1 450	84.1	$\alpha_{w1x}-\alpha_{w3o}$	842	81.1	$\alpha_{w2\gamma}-\alpha_{x\gamma}$	845	70.3
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w2o}$	2 045	86.1	$\alpha_{w1w3}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	84.1	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w2o}$	1 422	81.0	$\alpha_{w2\gamma}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	70.2
$\alpha_{rw2}-\alpha_{w3o}$	1 422	85.9	$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w1\gamma}$	2 082	84.1	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w2\gamma}$	1 450	80.5	$\alpha_{w1x}-\alpha_{x\gamma}$	845	70.1
$\alpha_{w1w3}-\alpha_{x\gamma}$	845	85.9	$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w2\gamma}$	2 082	84.1	$\alpha_{w2x}-\alpha_{w3o}$	842	80.5	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{ox}$	842	69.7
$\alpha_{rx}-\alpha_{w1x}$	582	85.7	$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w3o}$	2 045	84.1	$\alpha_{rw3}-\alpha_{x\gamma}$	582	80.4	$\alpha_{w2o}-\alpha_{w2\gamma}$	2 045	69.7
$\alpha_{ro}-\alpha_{x\gamma}$	592	85.5	$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w3\gamma}$	2 082	84.1	$\alpha_{w3o}-\alpha_{w3x}$	842	80.2	$\alpha_{w3x}-\alpha_{x\gamma}$	845	69.1
$\alpha_{rw1}-\alpha_{ox}$	579	85.5	$\alpha_{rw1}-\alpha_{r\gamma}$	1 450	84.0	$\alpha_{rw3}-\alpha_{ox}$	579	80.1	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w1o}$	1 422	69.0
$\alpha_{rw1}-\alpha_{ro}$	1 422	85.5	$\alpha_{rw1}-\alpha_{w1\gamma}$	1 450	84.0	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w2x}$	582	80.1	$\alpha_{w3o}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	68.9
$\alpha_{w1o}-\alpha_{w2o}$	2 045	85.5	$\alpha_{w2w3}-\alpha_{x\gamma}$	845	84.0	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w3\gamma}$	1 450	80.0	$\alpha_{w3x}-\alpha_{w3\gamma}$	845	68.9
$\alpha_{ro}-\alpha_{w1o}$	1 422	85.4	$\alpha_{w1w3}-\alpha_{w2w3}$	2 082	83.9	$\alpha_{rw3}-\alpha_{r\gamma}$	1 450	79.9	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w3x}$	842	68.1
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	85.3	$\alpha_{ro}-\alpha_{w2\gamma}$	1 422	83.8	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w3\gamma}$	1 450	79.9	$\alpha_{w3\gamma}-\alpha_{x\gamma}$	845	67.6
$\alpha_{rw1}-\alpha_{w1w2}$	1 450	85.2	$\alpha_{rw1}-\alpha_{rw3}$	1 450	83.8	$\alpha_{w3x}-\alpha_{o\gamma}$	842	79.9	$\alpha_{w1x}-\alpha_{w2\gamma}$	845	67.0
$\alpha_{rw1}-\alpha_{w1x}$	582	85.2	$\alpha_{rw2}-\alpha_{ox}$	579	83.8	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w1o}$	1 422	79.8	$\alpha_{w2x}-\alpha_{ox}$	842	67.0
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w1w3}$	2 082	85.2	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w1o}$	1 422	83.8	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w2w3}$	1 450	79.8	$\alpha_{w1o}-\alpha_{ox}$	842	65.9
$\alpha_{w1x}-\alpha_{w2w3}$	845	85.2	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w3\gamma}$	1 450	83.8	$\alpha_{w3o}-\alpha_{ox}$	842	79.8	$\alpha_{w2\gamma}-\alpha_{ox}$	842	65.8
$\alpha_{rw1}-\alpha_{o\gamma}$	1 422	85.1	$\alpha_{rw1}-\alpha_{w2w3}$	1 450	83.7	$\alpha_{w3x}-\alpha_{ox}$	842	79.8	$\alpha_{w3o}-\alpha_{w3\gamma}$	2 045	65.5
$\alpha_{rw1}-\alpha_{w1o}$	1 422	85.1	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w2x}$	582	83.7	$\alpha_{w2\gamma}-\alpha_{w3o}$	2 045	79.3	$\alpha_{w1x}-\alpha_{w3\gamma}$	845	65.4
$\alpha_{rw1}-\alpha_{w2x}$	582	85.1	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w2w3}$	1 450	83.7	$\alpha_{rw3}-\alpha_{w1x}$	582	79.2	$\alpha_{w2x}-\alpha_{w3\gamma}$	845	65.4

续表 3

Planes	Sample size	Accuracy rate/%	Planes	Sample size	Accuracy rate/%	Planes	Sample size	Accuracy rate/%	Planes	Sample size	Accuracy rate/%
$\alpha_{rw3}-\alpha_{w1w2}$	1 450	85.1	$\alpha_{rw2}-\alpha_{r\gamma}$	1 450	83.6	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w2x}$	582	79.2	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w2o}$	1 422	65.1
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w2w3}$	2 082	85.1	$\alpha_{rw2}-\alpha_{rw3}$	1 450	83.5	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w3x}$	582	79.2	$\alpha_{w3\gamma}-\alpha_{ox}$	842	64.7
$\alpha_{ro}-\alpha_{rx}$	592	85.0	$\alpha_{ro}-\alpha_{w1w3}$	1 422	83.3	$\alpha_{rx}-\alpha_{w1\gamma}$	582	79.0	$\alpha_{w2o}-\alpha_{x\gamma}$	842	64.5
$\alpha_{rw2}-\alpha_{w1w2}$	1 450	85.0	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w1x}$	582	83.3	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w1x}$	582	78.5	$\alpha_{w1x}-\alpha_{ox}$	842	64.4
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w1\gamma}$	2 082	85.0	$\alpha_{rw3}-\alpha_{ro}$	1 422	83.3	$\alpha_{w1x}-\alpha_{o\gamma}$	842	78.1	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w2x}$	842	63.8
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w2\gamma}$	2 082	85.0	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w2w3}$	2 045	83.3	$\alpha_{o\gamma}-\alpha_{x\gamma}$	859	77.5	$\alpha_{w2o}-\alpha_{w3\gamma}$	2 045	62.6
$\alpha_{w1w2}-\alpha_{w3\gamma}$	2 082	85.0	$\alpha_{w2\gamma}-\alpha_{w3\gamma}$	2 082	83.3	$\alpha_{ox}-\alpha_{o\gamma}$	859	77.1	$\alpha_{w1o}-\alpha_{x\gamma}$	842	61.4
$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{w3\gamma}$	2 082	85.0	$\alpha_{ro}-\alpha_{w3\gamma}$	1 422	83.2	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{w2o}$	2 045	76.8	$\alpha_{w3o}-\alpha_{x\gamma}$	842	59.6
$\alpha_{rw2}-\alpha_{ro}$	1 422	84.9	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w1w2}$	1 450	83.2	$\alpha_{w1o}-\alpha_{o\gamma}$	2 045	76.7	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w3\gamma}$	2 045	56.9
$\alpha_{rw3}-\alpha_{w1w3}$	1 450	84.9	$\alpha_{ro}-\alpha_{r\gamma}$	1 451	83.1	$\alpha_{rx}-\alpha_{w1o}$	579	76.2	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{w3o}$	1 422	54.2
$\alpha_{w2w3}-\alpha_{w3x}$	845	84.9	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w1\gamma}$	1 450	83.1	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w1\gamma}$	2 045	76.1	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w2\gamma}$	2 045	50.6
$\alpha_{rw2}-\alpha_{w2o}$	1 422	84.8	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w2w3}$	1 450	83.1	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{ox}$	592	75.7	$\alpha_{w1o}-\alpha_{w1x}$	842	40.0
$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{w2\gamma}$	2 082	84.8	$\alpha_{rw2}-\alpha_{w2\gamma}$	1 450	83.1	$\alpha_{rx}-\alpha_{w2o}$	579	75.1	$\alpha_{rx}-\alpha_{w3\gamma}$	582	39.0
$\alpha_{w2w3}-\alpha_{ox}$	842	84.8	$\alpha_{r\gamma}-\alpha_{o\gamma}$	1 451	83.1	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{x\gamma}$	845	75.1			
$\alpha_{ro}-\alpha_{w2o}$	1 422	84.7	$\alpha_{rw2}-\alpha_{x\gamma}$	582	83.0	$\alpha_{w1\gamma}-\alpha_{w2x}$	845	74.8			

4　结果和讨论

我们计算了 21 个光谱指数，并分析他们的分布情况。在宽波段谱指数分布图(图 1～图 2)中，我们发现有微弱双峰分布的宽波段谱指数一共有 9 个，其中 8 个明显区分耀变体的两个亚类(如图 3)。耀变体是一种宽波段非热辐射源，从无线电波长一直延伸到高能 γ 射线[22]。耀变体具有典型的双峰谱能量分布，其中的低能峰为同步辐射峰。耀变体两个亚类的光谱能量分布中，同步辐射峰的峰值功率与峰值频率存在反相关关系[6]，因此，与光谱能量分布峰值有关的多波段复合光谱指数构建的谱指数以及谱指数平面可以作为耀变体亚类的分类器。

如表 3，21 个谱指数两两组合一共有 210 种谱指数-谱指数图。基于谱指数-谱指数图的支持向量机，我们计算了他们的分类准确率。从中我们发现 $\alpha_{w1x}-\alpha_{w3x}$ 平面分类的准确率最高(见表 3)。为此，我们进一步研究了 w3 波段与 X 射线的流量相关性，发现这两个波段的流量关系对于耀变体的两个子类有明显的不同。如图 5，平谱射电类星体的 w3 波段与 X 射线的流量相关系数为 0.50，

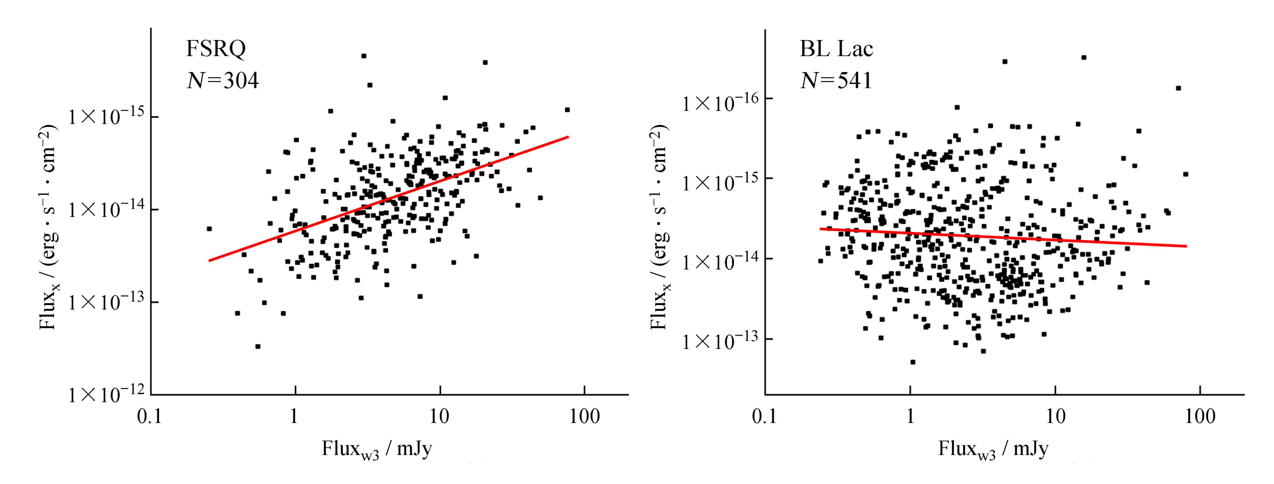


图 5　红外波段 w3 与 X-ray 波段的流量之间的相关性

Fig. 5　The correlation between infrared w3 and X-ray fluxes

表明相关性很强，但也可以看到数据点有较大的弥散，我们收集的数据的不同时性可能是数据弥散的原因之一；而蝎虎座 BL 型天体的相关系数为-0.07，相关系数几乎为零，即没有相关性。这个相关性分析也支持 X 射线辐射机制的不同可能是区分平谱射电类星体和蝎虎座 BL 型天体的主要物理原因。

5 总 结

本文以最新版的费米 4 期目录为主要样本，通过斯特拉斯堡天文台的数据库对其进行了多波段巡天数据的交叉匹配，得到多波段流量数据，进而计算了 21 种宽波段谱指数。在此基础上发现耀变体的 8 个宽波段谱指数分布具有双峰结构，且能比较明显地区分耀变体的两个亚类。通过机器学习中的支持向量机模型，我们进一步分析了 210 个谱指数平面对耀变体亚类的分类准确率，发现大部分准确率在 80%以上。宽波段谱指数及谱指数平面的耀变体分类作用可能与耀变体亚类同步辐射特征的不同有关，比如平谱射电类星体的光谱能量分布同步峰值频率总体上比蝎虎座 BL 型天体的小。

参考文献：

[1] URRY C M, PADOVANI P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107(715): 803-845.

[2] GHISELLINI G, CELOTTI A. The dividing line between FR I and FR II radio-galaxies [J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 379: L1.

[3] JESTER S. A simple test for the existence of two accretion modes in active galactic nuclei [J]. The Astrophysical Journal, 2005, 625(2): 667-679.

[4] GHISELLINI G, MARASCHI L, TAVECCHIO F. The Fermi blazars′ divide [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 396(1): L105.

[5] BHATTACHARYA D, SREEKUMAR P, MUKHOPADHYAY B, et al. Does black hole spin play a key role in the FSRQ/BL Lac dichotomy? [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2016, 16(4): 54.

[6] FOSSATI G, MARASCHI L, CELOTTI A, et al. A unifying view of the spectral energy distributions of blazars [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, 299(2): 433-448.

[7] ACKERMANN M, AJELLO M, ATWOOD W B, et al. The third catalog of active galactic nuclei detected by the Fermi large area telescope [J]. The Astrophysical Journal, 2015, 810(1): 14.

[8] AJELLO M, ANGIONI R, AXELSSON M, et al. The fourth catalog of active galactic nuclei detected by the Fermi large area telescope [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 892(2): 105.

[9] ABDOLLAHI S, ACERO F, BALDINI L, et al. Incremental Fermi large area telescope fourth source catalog [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2022, 260(2): 53.

[10] LEDDEN J E, O′DELL S L. The radio-optical-X-ray spectral flux distributions of blazars [J]. The Astrophysical Journal, 1985, 298(2): 630-643.

[11] CHIARO G, SALVETTI D, LA MURA G, et al. Blazar flaring patterns (B-FlaP) classifying blazar candidate of uncertain type in the third Fermi-LAT catalogue by artificial neural networks [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 462(3): 3180-3195.

[12] IVEZIĆ Ž, CONNOLLY A J, VANDERPLAS J T, et al. Statistics, data mining, and machine learning in astronomy: a practical Python guide for the analysis of survey data [M]. Princeton: Princeton University Press, 2014: 382-405.

[13] BALL N M, BRUNNER R J. Data mining and machine learning in astronomy [J]. International Journal of Modern Physics D, 2010, 19(7): 1049.

[14] HASSAN T, MIRABAL N, CONTRERAS J L, et al. Gamma-ray active galactic nucleus type through machine-learning algorithms [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 428(1): 220-225.

[15] ARSIOLI B, DEDIN P. Machine learning applied to multifrequency data in astrophysics: blazar classification [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 498(2): 1750.

[16] 朱惊天, 樊军辉, 蔡金庭. 罗马 5 期耀变体多波段目录 BZUs 的分类 [J]. 天文研究与技术, 2021, 18(1): 25-42.
ZHU J T, FAN J H, CAI J T. Classfication for BZUs in 5BZCAT [J]. Astronomical Research & Technology, 2021, 18(1): 25-42.

[17] LI H Z, XIE G Z, YI T F, et al. The spectral energy distributions of the Fermi blazars and connection among low-energy peaked BL Lacertae, high-energy peaked BL Lacertae, and flat spectrum radio quasars [J]. The Astrophysical Journal, 2010, 709(2): 1407-1411.

[18] CHEN L E, LI H Z, YI T F, et al. The spectral properties of Fermi blazars: the spectral sequence and unification of blazars [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2013, 13 (1): 5.

[19] LI H Z, CHEN L E. Spectral energy distributions of SDSS blazars [J]. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2014, 35(3): 387-389.

[20] LI H Z, CHEN L E, JIANG Y G, et al. The broadband spectral energy distributions of SDSS blazars [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2015, 15(7): 929.

[21] YI T F, ZHANG J, LU R J, et al. Evaluating optical classification for Fermi blazar candidates with a statistical method using broadband spectral indices [J]. The Astrophysical Journal, 2017, 838(1): 34.

[22] PADOVANI P, ALEXANDER D M, ASSEF R J, et al. Active galactic nuclei: what's in a name? [J]. Astronomy and Astrophysics Review, 2017, 25(1): 2.

Broadband Spectral Index Distribution of Blazar and its Taxonomic Function

Chen Zhihui[1,2], Yi Tingfeng[1,2*], Chen Junping[1], Wang Na[1], Pu Zhiyuan[1], Zhang Shun[1]

(1. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China, Email: yitingfeng@ynnu.edu.cn;
2. Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, Nanning 530004, China)

Abstract: There are two obvious peaks in the spectral energy distribution (SED) of the blazar, of which the low energy peak is the synchrotron radiation peak. There is an inverse correlation between the peak power of the synchrotron radiation peak of the blazar and the peak frequency, so the spectral index plane constructed by the multi-band composite spectral index related to the SED peak can be used as a classifier for the two subclasses of the blazar (flat-spectrum radio quasar (FSRQ) and BL-Lac object). In this paper, the cross matching of multi-wavelength data for the blazars in the Fermi four Catalogue (4FGL-DR3) is carried out through the database of Strasbourg Observatory, and multi-wavelength data set is obtained. Basing on this data set, we find that the distributions of the 8 broad band spectral indices, (α_{rw1}, α_{rw2}, α_{rw3}, α_{ro}, $\alpha_{r\gamma}$, α_{w1w2}, α_{w1w3}) and α_{w3x}, have obvious bimodal structure, and clearly distinguish the two subclasses of blazed variants (FSRQ and BL Lac). Through the support vector machine model in machine learning technology, we further analyze the classification effect of spectral index plane on subclasses of blazar, and find that most of the accuracy rates are above 80%.

Key words: Blazar; broadband spectral indices; machine learning; classification method